

Device for working material with laser, e.g. for boring and welding plastics, comprises position-focused modulator which produces predetermined power density distribution

Veröffentlichungsnummer DE10007391

Veröffentlichungsdatum: 2001-05-31

Erfinder RUSSEK ULRICH (DE); GILLNER ARNOLD (DE)

Anmelder: FRAUNHOFER GES FORSCHUNG (DE)

Klassifikation:

- Internationale: B23K26/06; B23K26/073; B23K26/06; (IPC1-7): B23K26/067; G02B26/00

- Europäische: B23K26/06F; B23K26/073

Anmeldenummer: DE20001007391 20000218

Prioritätsnummer(n): DE20001007391 20000218; DE19991049901 19991016

[Report a data error here](#)

Zusammenfassung von DE10007391

Device for working a material with a laser (4) comprises a position-focused modulator (1) which produces a predetermined power density distribution. Independent claims are included for: (a) a method for working a material with a laser containing the device; and (b) use of the modulator to produce a predetermined power density distribution when working a material.

Daten sind von der [esp@cenet](mailto:esp@cenet) Datenbank verfügbar - Worldwide

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**



①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**  
⑩ **DE 100 07 391 A 1**

⑤① Int. Cl. 7:  
**B 23 K 26/067**  
G 02 B 26/00

②① Aktenzeichen: 100 07 391.3  
②② Anmeldetag: 18. 2. 2000  
④③ Offenlegungstag: 31. 5. 2001

⑥⑥ Innere Priorität:  
199 49 901. 2 16. 10. 1999  
⑦① Anmelder:  
Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der  
angewandten Forschung e.V., 80636 München, DE

⑦② Erfinder:  
Russek, Ulrich, Dipl.-Phys., 58706 Menden, DE;  
Gillner, Arnold, Dr., 52159 Roetgen, DE

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen**

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤④ Verfahren und Vorrichtung für die Materialbearbeitung

⑤⑦ Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung und ein Verfahren für die Materialbearbeitung mit elektromagnetischer Strahlung. Die Vorrichtung ist gekennzeichnet durch den Einsatz eines ortsauflösenden Strahlmodulators zur Generierung einer vorgebbaren Leistungsdichteverteilung auf dem Werkstück. Das Verfahren ist gekennzeichnet durch eine ortsauflösende Modulation der Strahlung, wobei eine sequentielle und eine simultane Bearbeitung möglich ist. Ebenfalls möglich ist eine Bearbeitungsweise, die von ihrer Art her zwischen sequentieller und simultaner Bearbeitung angesiedelt ist.

DE 100 07 391 A 1

## Beschreibung

## Technisches Gebiet

Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung für die Materialbe- und Verarbeitung mit elektromagnetischer Strahlung nach den Oberbegriffen der unabhängigen Ansprüche 1, 11, 16 und 17. Bevorzugtes Anwendungsgebiet ist die Oberflächenbearbeitung von Werkstücken, wie zum Beispiel das Härten, Beschichten, Gravieren, Beschriften und Auftragsschweißen von Oberflächen. Ein weiteres Anwendungsgebiet ist das Schweißen und Bohren, wie zum Beispiel das Schweißen und Bohren von Kunststoffen.

## Stand der Technik

Bei der Bearbeitung von Materialien mit elektromagnetischer Strahlung, und hierbei insbesondere mit Laserstrahlung, spielt die richtig eingestellte Leistungsdichteverteilung (LDV) auf dem Werkstück eine dominierende Rolle. Die richtig eingestellte LDV besteht zum einen in der richtigen Form des Brennflecks (z. B. rund, elliptisch oder allgemein länglich), sowie der richtigen Intensitätsverteilung innerhalb des Brennflecks. So ist es zum Beispiel vorteilhaft, beim Laserstrahlschweißen von Aluminium einen länglichen Brennfleck einzusetzen, dessen Intensitätsschwerpunkt bezogen auf die Schweißvorzugsrichtung im vorderen Bereich liegt.

Zum Zwecke der Materialbearbeitung bieten sich wegen der dazu erforderlichen Leistungsdichten insbesondere Laser an. Diese weisen meist ein rundes Strahlprofil auf, das zur Gewährleistung einer prozessangepassten LDV über geeignete Optiken transformiert werden muss. Hierzu können zum einen statische Spiegel eingesetzt werden, bei denen die reflektierte Strahlung aufgrund der Oberflächenstruktur des Spiegels geeignet interferiert. Eine andere Möglichkeit bieten deformierbare Spiegel, bei denen über mechanisch verstellbare Aktuatoren die Oberflächenstruktur der Spiegeloberfläche und damit die Reflexion der beaufschlagenden Strahlung in begrenztem Maße gezielt gesteuert werden kann. Eine aufwendige und fehlerträchtige Methode ist ferner die Addition mindestens zweier Teilstrahlen.

Die genannten Möglichkeiten weisen den Nachteil auf, dass es sich um speziell angepasste Einzellösungen handelt, die unflexibel für jeden Anwendungsfall neu konzipiert werden müssen. Für viele Anwendungen erlauben die oben genannten Möglichkeiten zudem nur eine sequentielle Bearbeitung, d. h. die zu beaufschlagenden Oberflächenbereiche können nur auf langsame Art und Weise nacheinander bestrahlt werden. Diese sequentielle, schreibende Laserstrahlungsbearbeitung wird bei Schweißapplikationen auch Konturschweißen genannt. Beim Konturschweißen erfolgt ein kontinuierliches Abfahren der jeweiligen Bearbeitungsgeometrie mit dem fokussierten Laserstrahl bei einer zeitlich konstanten Leistungsdichteverteilung. Dies erfordert eine Relativbewegung von Werkstück und Laserstrahl mit entsprechenden fehlerträchtigen hochdynamischen, mechanischen Bewegungen. Eine interessante Alternative zum Konturschweißen ist das Simultanschweißen, bei der die gesamte Schweißnahtkontur auf einmal gefügt wird. Die sich damit ergebenden sehr kurzen Prozesszeiten lassen dieses Verfahren besonders für das Schweißen von Serienteilen in der Massenproduktion interessant erscheinen.

## Darstellung der Erfindung

Der Erfindung liegt das technische Problem zugrunde, die Nachteile nach dem Stand der Technik weitestgehend zu

vermeiden und eine Vorrichtung und ein Verfahren für die Materialbe- und Verarbeitung bereitzustellen, mit denen eine vorgebbare Leistungsdichteverteilung flexibel eingestellt werden kann. Vorrichtung und Verfahren sollen insbesondere nicht nur die sequentielle Bearbeitung von Werkstücken zulassen.

Die Lösung des Problems wird durch eine Vorrichtung und durch ein Verfahren nach den Oberbegriffen der Ansprüche 1, 11, 16 und 17 in Verbindung mit ihren kennzeichnenden Merkmalen angegeben. Vorteilhafte Weiterbildungen der erfindungsgemäßen Vorrichtung und des erfindungsgemäßen Verfahrens werden in den Unteransprüchen gegeben.

Erfindungsgemäß wurde erkannt, dass sich die genannten Probleme nach dem Stand der Technik durch eine Vorrichtung und ein Verfahren für die Materialbearbeitung mit elektromagnetischer Strahlung vermeiden lassen, bei denen ein ortsauflösender Strahlmodulator zur Generierung einer vorgebbaren Leistungsdichteverteilung vorgesehen ist. Hierdurch ist es möglich das Material sequentiell und simultan zu bearbeiten, aber zusätzlich eine Materialbearbeitung zu realisieren, die von ihrer Art her zwischen der sequentiellen und der simultanen Bearbeitung anzusiedeln ist.

Die ortsauflösende modulierte elektromagnetische Strahlung dient vorliegend zur Bearbeitung des zu beaufschlagenden Werkstücks. In diesem Sinne sind grundsätzlich alle Strahlungsquellen einsetzbar, die die meist thermisch bedingten Veränderungen des Werkstücks bewirken können. Um die prozessbedingt erforderlichen Strahlungsdichten bereitzustellen, eignen sich hierzu besonders Laser. Insbesondere für die Kunststoffbe- und -verarbeitung sind Dioden- und Excimerlaser geeignet.

Im Sinne der Erfindung kann es sich dabei um einen amplitudenmodulierenden oder einen phasenmodulierenden Strahlmodulator handeln. Auch eine Kombination von Amplituden- und Phasenmodulation ist möglich.

Die Amplitudenmodulation lässt sich prinzipiell bei allen Strahlungsquellen einsetzen und ist dadurch besonders universell einsetzbar. Die Amplitudenmodulation beruht darauf, dass ausgehend von einem bereits polarisierten Strahlungsfeld bestimmte Teilbereiche dieses Strahlungsfeldes in ihrem Polarisationszustand kontrolliert verändert und mit einem optischen Element (Analysator) entsprechend ihres Polarisationszustandes selektiert werden. Damit ist eine Modulation der Amplitude der einzelnen Teilbereiche des gesamten Strahlungsfeldes möglich. Ziel der Phasenmodulation ist es, die Phase eines elektromagnetischen Strahlungsfeldes so zu modulieren, dass ein gewünschtes Interferenzmuster entsteht. Ausgehend von einem polarisierten Strahlungsfeld mit ausreichender transversaler Kohärenz werden die Phasenlagen einzelner Teilbereiche derart kontrolliert verändert, dass diese Teilbereiche in der gewünschten Weise interferieren. Die Phasenmodulation weist den Vorteil einer verbesserten Energiebilanz auf, da keine Strahlungsanteile des ursprünglichen, unmodulierten Strahlungsfeldes ausgeblendet werden. Daher eignet sich die Phasenmodulation besonders bei Anwendungen, bei denen eine besonders hohe LDV auf dem Werkstück erforderlich ist.

Vorteilhafterweise enthält der Strahlmodulator eine Anordnung einzelner, die vorgegebene LDV steuernder Zellen. In einer einfachen Anordnung sind die Zellen in einer Ebene angeordnet, die senkrecht hierzu mit der Strahlung beaufschlagt wird. Durch die Zellen wird das vorgegebene elektromagnetische Strahlungsfeld in einzelne Teilstrahlenbündel zerteilt. Jedes der Teilstrahlenbündel wird dabei in den Zellen individuell amplituden- und/oder phasenmoduliert, wobei im Falle der Amplitudenmodulation noch ein zusätzlicher Analysator erforderlich ist. Nach dem Verlassen des

Strahlmodulatore bilden die einzelnen Teilstrahlen in ihrer Gesamtheit ein neues, n  mmer amplituden- und/oder phasenmoduliertes elektromagnetisches Strahlungsfeld. Nach der Propagation des gesamten Strahlungsfeldes durch strahlformende und strahlf  hrende optische Elemente wird auf dem Werkstück die vorgegebene LDV erreicht. Diese Lösung weist den Vorteil auf, dass eine Steuerung der LDV pro Teilstrahlenbündel möglich ist, wobei die LDV eines Teilstrahlenb  ndels unabhängig von der LDV anderer Teilstrahlenbündel ist. Die Steuerung erfolgt damit besonders einfach und flexibel. Die Ortsauflösung der sich ergebenden LDV in der Werkstückebene bestimmt sich maßgeblich nach der Strahlqualität des ursprünglichen Strahlungsfeldes, der Geometrie und Anzahl der einzelnen Zellen sowie der Qualität der nachgeschalteten strahlformenden und -führenden Optik.

Der Strahlmodulator moduliert damit im Sinne der obigen Ausführungen ortsaufl  send und erlaubt die Generierung einer vorgebbaren oder vorgegebenen LDV auf dem Werkstück. Vorgegeben werden kann sowohl der Brennfleck bzw. Fokus in seinen äusseren Abmessungen, als auch die Intensität der Strahlung innerhalb des gewünschten Brennflecks. Wird zum Beispiel vom Anwender ein rechteckförmiger Fokus vorgegeben, so wird durch maximales Ausblenden entsprechender Zellen des Strahlmodulators sichergestellt, dass keine Strahlungsintensität für Punkte ausserhalb des rechteckigen Fokus vorliegt. Innerhalb des Fokus kann durch eine geeignete Modulation der jeweiligen Zellen die vorgegebene LDV eingestellt werden. Die Ortsauflösung der sich ergebenden LDV bestimmt sich dann maßgeblich nach Geometrie und Anzahl der einzelnen Zellen.

Für die die LDV steuernden Zellen gibt es verschiedene Realisierungsmöglichkeiten.

Eine Möglichkeit besteht darin, dass jede Zelle mindestens einen beweglichen Mikrospiegel enthält. Der Strahlmodulator besteht dann in einer Anordnung aus beweglichen Mikrospiegeln, deren Stellung vorzugsweise elektronisch steuerbar ist (englisch DMD: digital mirror device). In der einfachsten Ausführung können die Mikrospiegel nur zwei Positionen einnehmen. In einer ersten Position wird die gesamte auftreffende Strahlung reflektiert. In einer zweiten Stellung ist die dahinter befindliche Öffnung maximal freigegeben. In einer vorteilhafteren Ausführung können die Kippwinkel der Mikrospiegel entweder in Stufen oder stufenlos variiert werden. Dadurch ist eine feinere Steuerung der das Werkstück beaufschlagenden Strahlung möglich. Durch eine Steuereinheit werden die für die gewünschte LDV erforderlichen Kippwinkel bestimmt und eingestellt.

Eine weitere Möglichkeit der Ausgestaltung des Strahlmodulators besteht darin, dass die Zellen einen Mikropolarisator enthalten. Der Strahlmodulator besteht dann in einer Anordnung von Mikropolarisatoren. Eine Phasenmodulation ist damit direkt möglich. Im Zusammenwirken mit einem der Mikropolarisatorenanordnung nachgeschalteten Polarisator kann die durch einen Mikropolarisator tretende Strahlung amplitudenmoduliert werden.

In einer bevorzugten Ausführungsform bestehen die einzelnen (Modulations-)Zellen des Strahlmodulators aus Flüssigkristallen. In diesem Fall weist der Strahlmodulator eine Anordnung von einzelnen Flüssigkristallzellen auf. Die Flüssigkristallzellen können in einem regelmässigem Schema flächig angeordnet sein und bilden dann eine regelmässige Anordnung bzw. ein Array individueller Flüssigkristallzellen, d. h. individueller Einzelmodulatoren.

Die Modulation eines auf die einzelne Zelle fallenden Teilstrahlenb  ndels geschieht innerhalb der Zelle durch gezielte Beeinflussung und Ausnutzung der elektro-optischen Effekte. Beispielsweise kann man sich die Doppelbre-

chungseigenschaften der Flüssigkristalle zu Nutze machen. Konkret kann durch Anlegen einer elektrischen Spannung an die Flüssigkristallzelle der ausserordentliche Brechungsindex der Flüssigkristalle verändert werden. Dadurch kann wiederum die Polarisierung der einfallenden elektromagnetischen Strahlung verändert werden. Die Polarisationsrichtung lässt sich dabei in Abhängigkeit von der angelegten Spannung kontinuierlich oder schrittweise durchstimmen. Durch Anlegen individueller Spannungen an die einzelnen Zellen der Fl  ssigkristallzellenanordnung erhält man somit innerhalb des Gesamtstrahls eine Vielzahl individueller Polarisationsrichtungen. Durch diese Vorgehensweise ist eine Phasenmodulation direkt möglich. Je nach Amplitude der an eine Zelle angelegten alternierenden Spannung, meist eine Rechteckspannung, können die Brechungsindizes der Flüssigkristalle gezielt eingestellt werden. Durch die gezielte Modulation der Phasen der einzelnen Teilstrahlen, erreicht man das diese Teilstrahlen in der Werkstückebene zu der gewünschten LDV interferieren. Befindet sich im Strahlengang zusätzlich ein Analysator, so lässt sich die Strahlung amplitudenmodulieren. Auch eine Kombination von Amplituden- und Phasenmodulation ist realisierbar, zum Beispiel in dem innerhalb eines einzigen Modulators zwei Flüssigkristallarrays in optischer Flucht nacheinander angeordnet werden.

Die modulierende Einheit, bestehend aus einer Anordnung von Flüssigkristallzellen und dem Polarisator, moduliert die Strahlung ortsaufl  st und wird daher in der Literatur vereinzelt als ortsauflösender Strahlmodulator (spatial light modulator, SLM) bezeichnet. Abweichend hiervon wird in einigen Literaturstellen, und auch im Rahmen dieser Erfindungsbeschreibung, bereits die Anordnung von Flüssigkristallzellen als ortsauflösender Strahlmodulator aufgefasst.

Wird amplitudenmoduliert, so kann der Polarisator in Reflexion oder in Transmission polarisieren. Ein reflektierender Polarisator ist insbesondere bei hoher LDV günstig, da sich ein in Transmission betriebener Polarisator zu stark erwärmen würde. Es ist zweckmässig, die ungenutzten Strahlungsanteile in einer Strahlfalle zu absorbieren.

Im Sinne der vorliegenden Erfindung geeignet sind antiferroelektrische Flüssigkristalle wie zum Beispiel nematische, smektische und cholestrische Flüssigkristalle. Diese erlauben insbesondere ein kontinuierliches Modulieren der Polarisations- bzw. Phasenlage. Dadurch ist eine besonders feine Einstellung der Polarisations- bzw. Phasenlage und damit besonders feine Abstufungen innerhalb der LDV möglich. Ferner können auch ferroelektrische Flüssigkristalle eingesetzt werden, die den Vorteil sehr kurzer Schaltzeiten mit sich bringen, jedoch nur eine schrittweise bzw. sprunghafte Einstellung der Polarisations- bzw. Phasenlage erlauben. Dies bedingt gröbere Abstufungen in der Einstellung der Polarisations- bzw. Phasenlage und damit gröbere Abstufungen innerhalb der LDV. Durch ferroelektrische Flüssigkristalle ist damit ein geringeres Auflösevermögen der LDV im Vergleich zu anti-ferroelektrischen Flüssigkristallen möglich.

Die bevorzugte Wahl einer Anordnung von Flüssigkristallzellen enthaltenden Strahlmodulators macht den Einsatz einer modular aufgebauten Anordnung von Hochleistungsdiodenlaserbarren oder eines Excimerlasers als elektromagnetische Strahlungsquelle besonders attraktiv. Fl  ssigkristallzellenanordnungen sind meist flachen, rechteckigen Zuschnitts, so dass darauf ein homogenes, rechteckiges Strahlprofil einer Anordnung von Hochleistungsdiodenlasern oder eines Excimerlasers mit besonders geringen Abbildungsfehlern abgebildet werden kann. Die einzelnen Zellen können unterschiedliche Formen haben. Bei eindimen-

sionalen Strahlmodulatoren haben die einzelnen Zellen eine rechteckige, zum Beispiel streifenförmige Form. Bei zweidimensionalen Strahlmodulatoren sollte die Form und Anordnung der einzelnen Zellen so gewählt sein, dass die Zellenzwischenräume klein gehalten werden, um die örtliche Auflösung der LDV fein und die undefinierten bzw. unmodulierten Bereiche klein zu halten. Es bieten sich rechteckige, quadratische oder sechseckige Geometrien an. Es sind auch andere Geometrien denkbar, die dann entsprechend der Aufgabenstellung angepasst werden. Bei anderen Lasern liegt zumeist ein rundes Strahlprofil vor, so dass aufwendige Optiken erforderlich sind, welche das runde Strahlprofil auf die rechteckige Flüssigkristallanordnung abbilden. Alternativ müsste bei rundem Strahlprofil entweder ein Teil der Zellen nicht mit Strahlung beaufschlagt werden oder der Strahl entsprechend aufgeweitet werden, was jedoch wenig effizient wäre.

Um die Ausgangs-LDV der zur Verfügung stehenden Strahlungsquelle möglichst effektiv auszunutzen, sollte wenig Strahlung durch den Strahlmodulator und die strahlführenden und -formenden optischen Elementen verloren gehen. Eine für den individuellen Bearbeitungsprozess vorgegebene LDV mit möglichst grosser Intensität auf dem Werkstück lässt sich insbesondere dann realisieren, wenn die Zerstörschwelle der einzelnen den Strahlmodulator bildenden optischen Komponenten nicht überschritten wird bzw. wenn Zellen mit möglichst hoher Zerstörschwelle gewählt werden. Zum Zwecke der Materialbe- und Verarbeitung ist es daher günstig, eine Zerstörschwelle von  $100 \text{ W/cm}^2$  nicht zu unterschreiten, für gewisse Anwendungsgebiete sind noch höhere Werte von mindestens  $200 \text{ W/cm}^2$  bis  $1000 \text{ W/cm}^2$  vorteilhaft.

Um einen erhöhten Dynamikbereich und eine einfachere Handhabung zu gewährleisten ist eine homogene Ausleuchtung des aktiven Bereiches des Strahlmodulators vorteilhaft. Unter homogener Ausleuchtung ist zu verstehen, dass alle Zellen mit der gleichen Strahlungsintensität beaufschlagt werden.

Zur kontrollierten Modulation desjenigen Strahlungsanteiles, welcher durch eine einzelne Modulationszelle hindurchtritt ist es günstig, wenn die einzelnen Modulationszellen einzeln und individuell adressierbar sind. Durch die individuelle Adressierung kann zum Beispiel eine einzelne Flüssigkristallzelle mit einer individuellen Spannung beaufschlagt werden. Bevorzugt erfolgt die Adressierung elektrisch, jedoch ist auch eine optische Adressierung möglich. Die Adressierung erfolgt über eine geeignete Steuereinheit, zum Beispiel über einen Computer. Geeignete Mittel sorgen für die Zuführung des Adressierungssignals von der Steuereinheit zur einzelnen Zelle. Diese Mittel können zum Beispiel elektrische Kabel, Controller, Lichtleiterfasern und dergleichen sein. Die Steuereinheit sorgt für eine rasche und flexible Anpassung der LDV an die jeweiligen Erfordernisse des Bearbeitungsprozesses und der Werkstoffparameter, um ein optimales Bearbeitungsergebnis zu erzielen.

Neben der genannten externen Steuereinheit ist es auch möglich, die Steuereinheit mit dem Strahlmodulator zu einer Einheit zusammenzufassen. In einem weiteren Sinne kann dies ebenfalls als ein Strahlmodulator aufgefasst werden. Die Steuereinheit können beispielsweise ein oder mehrere programmierte oder programmierbare Chips wie zum Beispiel Asics oder Eproms sein. Mit einer geeigneten Spannungsversorgung kann dann der Strahlmodulator seine Arbeit autonom verrichten. Voraussetzung ist hierbei, dass die einzelnen Zellen durch die integrierte Steuereinheit individuell adressierbar sind. Von Vorteil ist es dabei, dass dann der Strahlmodulator bzw. die darin enthaltene Steuereinheit auch adressierbar ist. Dann nämlich kann die Funktions-

weise der Chips zusätzlich extern beeinflusst werden und zum Beispiel zwischen mehreren in den Speicherbausteinen vorhandenen Arbeitsprogrammen gewechselt werden.

Um eine möglichst homogene Beaufschlagung des Strahlmodulators sicher zu stellen, kann optional eine Optik zur Homogenisierung der beaufschlagenden Strahlung vorgesehen sein. Dies ist besonders bei Diodenlasern vorteilhaft, da diese in der Regel große Divergenzwinkel aufweisen. Die aus dem Strahlmodulator austretende Strahlung kann ebenfalls optional über eine weitere Optik auf das Werkstück abgebildet (fokussiert) werden.

Im Sinne der vorliegenden Erfindung kann der Strahlmodulator sowohl eine eindimensionale als auch eine zweidimensionale Strahlmodulation vornehmen. Es können ein- und zweidimensional aufgebaute Modulatoren eingesetzt werden. Die zweidimensionalen Modulatoren erlauben eine Simultanbearbeitung von Werkstücken, während die eindimensionalen Modulatoren dies nicht zulassen. Beide Varianten von Strahlmodulatoren erlauben eine Bearbeitung die von ihrer Art her zwischen den beiden Varianten sequentielle Bearbeitung und Simultanbearbeitung liegt. Wird mit der erfindungsgemäßen Vorrichtung geschweißt, so ist der Schweißprozess ein Mittelding zwischen Konturschweißen und Simultanschweißen.

Die erfindungsgemäße Vorrichtung und das erfindungsgemäße Verfahren sollen nachfolgend anhand von Ausführungsbeispielen erläutert werden.

Fig. 1a zeigt das erfindungsgemäße Verfahren der eindimensionalen Strahlmodulation mit Hilfe der erfindungsgemäßen Vorrichtung. Der Strahlmodulator (1) besteht in diesem Beispiel aus 10 länglichen bzw. streifenförmigen (Modulations-)Zellen (2) mit einem nachgeschalteten Polarisator (3) zur Amplitudenmodulation. Die Zellen sind vorliegend smektische Flüssigkristallzellen. Die Längsrichtung der Zellen sei die y-Richtung. Die Zellen sind in x-Richtung nebeneinander angeordnet. Die Zellen werden vertikal von oben mit polarisierter Strahlung (4) eines Diodenlasers beaufschlagt, was durch die eingezeichneten Pfeile angedeutet ist. Die aktive Fläche (5) steht für die Strahlmodulation zur Verfügung. Die durch eine einzelne Modulationszelle hindurchtretende elektromagnetische Strahlung erhält eine bestimmte modulierte Polarisation. Benachbarte Zellen modulieren jedoch unterschiedlich, so dass es zu einer eindimensionalen Modulation mit unterschiedlichen Strahlungsintensitäten in x-Richtung kommt. In der Werkstückebene (6) äussert sich dies durch ein streifenförmiges Intensitätsmuster. In y-Richtung wird keine Modulation vorgenommen. Dort ist die Intensität innerhalb eines Streifens konstant bzw. entspricht der Ausgangs-LDV.

Die eindimensionale Strahlmodulation bietet sich an, wenn für den Bearbeitungsprozess ein länglicher Fokus auf das Werkstück abgebildet werden muss, d. h. wenn die Fokusslänge grösser als die Fokusbreite ist. Als Spezialfall ist dabei ein linienförmiger Fokus möglich. In Richtung der Fokusslänge bzw. der langen Achse der Fokuslinie, dies sei nachfolgend die x-Richtung, wird moduliert und darüber die vorgegebene Intensitätsverteilung eingestellt. Senkrecht hierzu, d. h. in y-Richtung, wird nicht moduliert. Die Intensitätsverteilung in y-Richtung stimmt dann bis auf einen konstanten Faktor mit derjenigen Intensitätsverteilung überein, mit der der Strahlmodulator beaufschlagt wurde. Bei der Bearbeitung erfolgt eine Relativbewegung von Fokuslinie und Werkstück, wobei zum Beispiel die zu beaufschlagenden Teile der ruhenden Werkstückfläche nacheinander vom Bearbeitungsstrahl abgefahren werden. Dabei wird die jeweils notwendige Intensitätsverteilung auf dem Werkstück dynamisch eingestellt. Die Bearbeitung erfolgt quasi-simultan, d. h. die Vorschubbewegung ist kontinuierlich bei einer

Einstellung der Intensitätsverteilung in diskreten Schritten. Für jede Fokusposition wird die benötigte LDV durch einen hierzu korrespondierenden Satz berechneter Spannungswerte eingestellt. Die Anzahl der erforderlichen Bearbeitungsschritte entspricht dem Quotienten aus der Bearbeitungslänge und der gewählten Fokus- bzw. Bearbeitungsschrittbreite. Diese Zahl entspricht auch der Anzahl der erforderlichen Sätze an elektrischen Spannungswerten, welche von der Steuereinheit zur Verfügung gestellt werden müssen. Das Zusammenspiel der gewählten Vorschubgeschwindigkeit und Fokusbreite bestimmt die Frequenz, mit der die Flüssigkristallanordnung als dynamische Maske die gewünschte LDV auf dem Werkstück einstellt.

Die zweidimensionale Strahlmodulation ist in Fig. 1b dargestellt. Der Strahlmodulator (1) besteht in diesem Beispiel aus insgesamt 25 einzelnen cholesterischen Flüssigkristallzellen (2), wobei in x- und y-Richtung jeweils 5 Zellen liegen. Strahlmodulator (1) und Polarisator (3) bilden die modulierende Einheit, mit der es möglich ist, sowohl in x- als auch in y-Richtung eine Modulation der Laserstrahlung (4) vorzunehmen. Damit ist die Intensität weder in x- noch in y-Richtung konstant. Der grosse Vorzug der zweidimensionalen Strahlmodulation besteht darin, dass damit auch eine Simultanbearbeitung des Werkstücks möglich ist. Dies soll nachfolgend anhand der Fig. 2a bis 2c erläutert werden.

Soll zum Beispiel die Kontur des Buchstaben "M" auf ein Werkstück graviert werden, so muss gemäß Fig. 2a bei einer seriellen Bearbeitung durch eine Relativbewegung von Werkstück und Strahl der gesamte Weg entlang der Punkte 1 → 2 → 3 → 4 → 5 nacheinander bzw. seriell abgefahren werden. Eine derartige Gravur benötigt eine gewisse Bearbeitungszeit. Es wäre wünschenswert die Prozesszeit zu verkürzen, d. h. alle zu bearbeitenden Bereiche gleichzeitig, d. h. simultan, zu bearbeiten.

Eine solche Simultanbearbeitung erlaubt die zweidimensionale Strahlmodulation wie in Fig. 2b und Fig. 2c dargestellt. Notwendige Voraussetzung hierfür ist lediglich, dass der Buchstabe "M" in die auf das Werkstück projizierte aktive Fläche (5) passt. In diesem Fall können die einzelnen Zellen des Strahlmodulators so angesteuert werden, dass in der Werkstückebene nur die Kontur des Buchstaben "M" mit Strahlung beaufschlagt wird. Die Beaufschlagung aller dieser Punkte erfolgt gleichzeitig. Umgekehrt können die Zellen des Strahlmodulators auch so angesteuert werden, dass alle Punkte bis auf die Punkte der Kontur mit Strahlung beaufschlagt werden. Die Ergebnisse dieser beiden Möglichkeiten entsprechen Positiv (Fig. 2b) und Negativ (Fig. 2c) in der Fotografie. Mit der Anzahl der Zellen pro Flächeneinheit steigt sowohl die mögliche Auflösung einer Kontur als auch der Aufwand der Adressierung der einzelnen Zellen.

Die eindimensionale Strahlmodulation erlaubt eine Bearbeitung, welche die kurzen Prozesszeiten der Simultanbearbeitung mit der Flexibilität der sequentiellen Bearbeitung verbindet. Diese Werkstückbe- oder Verarbeitung mit eindimensionaler Strahlmodulation soll nachfolgend als quasi-simultane Bearbeitung bezeichnet werden. Sie soll anhand von Fig. 3a und Fig. 3b erläutert werden.

Bei der quasi-simultanen Materialbearbeitung erfolgt die Beaufschlagung des Werkstücks derart, dass der längliche Fokus vorbestimmte Teile der zu bearbeitenden Werkstückfläche nacheinander (sequentiell) abfährt, und dabei die Strahlung entlang der langen Fokusachse strahl- bzw. intensitätsmoduliert wird.

Fig. 3a und Fig. 3b zeigen jeweils eine zu bearbeitende Werkstückfläche (6), die man sich gedanklich in einzelne Teilflächen (7) zerteilt vorstellen kann. Demgemäß erscheint die Werkstückfläche (6) in Fig. 3a bzw. Fig. 3b als

ein quadratisches Muster. In Fig. 3a ist der mit seiner langen Achse in x-Richtung ausgerichtete linienförmige Fokus (8) in x-Richtung größer als die Ausdehnung der Bearbeitungsfläche in x-Richtung, d. h. breiter als der Buchstaben "M". Befindet sich die Fokusanlinie in der eingezeichneten Position, so können alle Punkte der Kontur entlang der x-Richtung simultan bearbeitet werden. Dies erfolgt, wie oben beschrieben, dadurch, dass alle Teilflächen (7) des linienförmigen Fokus (8) individuell moduliert werden. Fokus und Werkstück werden bei der Bearbeitung relativ zueinander in y-Richtung verschoben. Dies wird durch die vertikalen Doppelpfeile am linken und rechten Rand von Fig. 3a angedeutet. Auf diese Weise wird die zu bearbeitende Werkstückfläche in y-Richtung nacheinander bearbeitet. Gleiches gilt sinngemäß, wenn die Fokusanlinie (8) vertikal bzw. in y-Richtung ausgerichtet ist, wobei dann die Relativbewegung in x-Richtung erfolgt, was durch die horizontalen Doppelpfeile am oberen und unteren Rand der Fig. 3a angedeutet ist.

Im Sinne der vorstehenden Ausführungen reicht es auch aus, dass der linienförmige Fokus (8) in x-Richtung gleich groß ist wie die Ausdehnung der Kontur des Buchstaben "M" in x-Richtung.

Ist jedoch der linienförmige Fokus (8) mit seiner in x-Richtung ausgerichteten langen Achse kleiner als die Ausdehnung der Kontur des Buchstaben "M" in x-Richtung, so muss der Fokus (8) wie in Fig. 3b nicht nur in y-Richtung, sondern auch in x-Richtung verschoben werden. In Fig. 3b sind mehrere Beispiele für derartige Foki (8) dargestellt. Auf welche Teilflächen der Brennpfleck gelenkt wird richtet sich nach den jeweiligen Prozesserfordernissen. So kann es erforderlich sein, die Werkstückoberfläche vollflächig abzufahren und zu bearbeiten. Für diesen Fall sind insbesondere bei eingesetzten Diodenlasern wegen deren rechteckförmigen Ausgangs-LDV rechteckförmige Teilflächen besonders vorteilhaft. Es kann auch ausreichen, dass nur Teile der gesamten Werkstückoberfläche abgefahren werden wie insbesondere bei Fig. 3b. Dadurch, dass nur die vorbestimmten Teilflächen des Werkstücks abgefahren werden und diese jeweils simultan bearbeitet werden, kann die Bearbeitungsgeschwindigkeit erheblich gesteigert werden.

Die das modulierende System verlassende elektromagnetische Strahlung kann zum einen optisch unbehandelt in die Werkstückebene gelangen oder aber mittels einer strahlführenden und/oder strahlformenden Optik in die Werkstückebene abgebildet werden.

Auf eine weitere optische Beeinflussung der modulierten Strahlung nach Verlassen des modulierenden Systems kann gegebenenfalls verzichtet werden, wenn man die Werkstückebene entsprechend nah an das modulierende System bringt, so dass eventuelle Beugungs- oder Streuverluste und damit Auflösungsverluste gering gehalten werden. Es bietet sich dabei an, Mittel bereitzustellen, welche eine Verschmutzung des modulierenden Systems durch vom Werkstück abgelöste und/oder verdampfte Partikel verhindern. So kann das modulierende System in einem Gehäuse untergebracht werden, wobei die das Werkstück beaufschlagende Strahlung durch ein für die jeweilige Strahlung transparentes Schutzfenster aus dem Gehäuse ausgekoppelt wird. Auch möglich ist der Einsatz einer Querluftströmung (sog. genannter cross-jet), welche vom Bearbeitungsbereich stammende Partikel ablenkt.

Weiterhin ist es möglich, durch ein der Modulation nachgeschaltetes optisches System die erzeugte Leistungsdichteverteilung in die Werkstückebene abzubilden. Dies erlaubt insbesondere eine exakte Anpassung der Abmessungen der LDV an die Werkstückabmessungen als auch eine Variation des Arbeitsabstandes.

Fig. 4 zeigt ein Blockschaltbild zur Realisierung einer orts aufgelösten eindimensionalen Strahlmodulation mit dem erfindungsgemäßen Strahlmodulator. Die Strahlung eines Diodenlasers (9) wird mittels einer Optik (10) homogenisiert und beaufschlagt einen Strahlmodulator (1). Der Strahlmodulator besteht aus einer Anordnung mit 640 streifenförmigen nematischen Flüssigkristallzellen (2) die jeweils eine Breite von etwa  $97 \mu\text{m}$  und einen Abstand von  $3 \mu\text{m}$  haben. Der aktive Bereich (5) ist etwa  $64 \text{ mm}$  breit und  $7 \text{ mm}$  hoch. Durch eine vorgeschaltete Homogenisierung wird der aktive Bereich homogen ausgeleuchtet, so dass jede Modulationszelle in etwa mit der gleichen Strahlungsintensität beaufschlagt wird. Die ursprünglich emittierte Diodenlaserstrahlung ist zu 90% relativ zum pn-Übergang linear polarisiert.

Bei einer optischen Zerstörschwelle der Flüssigkristallanordnung von etwa  $150 \text{ W/cm}^2$  wird die aktive Fläche mit einer Leistung  $P_0$  von maximal  $650 \text{ W}$  homogen beaufschlagt. Ca. 70% von  $P_0$  erreichen die Werkstückoberfläche und bilden einen linienförmigen Brennfleck mit den Abmessungen  $30 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ . Dies führt zu einer partiellen Intensität von  $1400 \text{ W/cm}^2$ . Bei einer zweiten Flüssigkristallanordnung mit einer höheren Zerstörschwelle von  $500 \text{ W/cm}^2$  ergibt sich eine partielle Intensität von etwa  $4600 \text{ W/cm}^2$ . Für Bearbeitungsverfahren mit hohem Intensitätsbedarf auf der Werkstückoberfläche sind Zerstörschwellen von  $500 \text{ W/cm}^2$  und mehr wünschenswert.

Die obere Bildhälfte von Fig. 4 entspricht der Betrachtung des gesamten Aufbaus in der Vorderansicht, d. h. der Betrachtung in Richtung der fast axis, während die untere Bildhälfte die gleiche Anordnung in Draufsicht bzw. in Richtung der slow axis zeigt. Die slow axis verläuft in x-Richtung und die fast axis in y-Richtung. Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist in der unteren Bildhälfte auf die wiederholte Darstellung der Komponenten (11, 12, 13, 14) verzichtet worden.

Als Strahlungsquelle (9) dient eine Diodenlaseranordnung. Die emittierte Strahlung wird zunächst mittels eines optischen Systems (10) homogenisiert, so dass der homogene Bereich des Strahlmodulators (1) homogen ausgeleuchtet wird. Vor und nach dem Strahlmodulator sind die Leistungsdichteverteilungen  $P(x)$  und  $P(y)$  in x- bzw. y-Richtung plateauartig (top hat). Sie unterscheiden sich jedoch hinsichtlich der Polarisation in den Teilstrahlbündeln. Der Polarisator (3) nimmt die Selektion und damit die Modulation entsprechend der durch den streifenförmigen Flüssigkristallmodulator (1) aufgeprägten Polarisationslagen vor.

Nach dem Strahlmodulator (1) durchläuft die Strahlung einen Polarisator (3). Strahlmodulator und der in Reflexion betriebene Polarisator bilden zusammen die modulierende Einheit. Die ungenutzte Strahlung wird in einer Strahlfalle (11) absorbiert, welche von einer Kühlung (12) gekühlt wird. Im Falle der eindimensionalen Amplitudenmodulation erfolgt entlang der x-Richtung keine Modulation. Vor oder nach dem Polarisator wird die Strahlung in x-Richtung fokussiert, um eine höhere Intensität entlang des linienförmigen Fokus innerhalb der Werkstückebene (6) zu erzielen. Die durch die Fokussierung bewirkte Verkleinerung des Fokus in x-Richtung führt dazu, dass  $P(x)$  nach Austritt aus der Abbildungsoptik (15), wie in Fig. 4 zu sehen, eine kleinere Halbwertsbreite als  $P(y)$  aufweist. Bei der Darstellung der unmittelbar vor der Werkstückfläche (6) vorhandenen Leistungsdichte  $P(x)$  in Fig. 4 ist  $P(x)$  mit der y-Position parametrisiert.

Die Amplitudenmodulation erfolgt ausschliesslich in y-Richtung (eindimensionale Amplitudenmodulation). Nach Austritt der Strahlung aus dem Polarisator (3) variiert  $P(y)$

entsprechend und ist an den Bearbeitungsprozess angepasst.

Die Steuerung der Amplitudenmodulation erfolgt mittels eines Computers (13) der den Strahlmodulator (1) über die Spannungsversorgung (14) elektrisch ansteuert. Der Computer errechnet prozessangepasste Sätze von Spannungswerten, mit denen die einzelnen Zellen unter Zuhilfenahme einer elektrischen Versorgung (14) sowie Mitteln zur Übertragung der elektrischen Adressierungssignale (nicht gezeigt) individuell beaufschlagt werden. Da die optische Achse der jeweiligen Flüssigkristallzelle der angelegten Spannung praktisch verzögerungsfrei folgt, erlaubt die Steuereinheit eine dynamische Anpassung der LDV an die jeweiligen Bearbeitungserfordernisse während der Relativbewegung von Werkstück und Strahl. Eine nachgeschaltete Abbildungsoptik (15) bildet die modulierte LDV auf das Werkstückfläche (6) ab.

#### Bezugszeichenliste

- 1 Strahlmodulator
- 2 einzelne (Modulations-)Zelle
- 3 Polarisator
- 4 elektromagnetische Strahlung
- 5 aktive, d. h. mit Strahlung beaufschlagbare Oberfläche des Strahlmodulators
- 6 Werkstückfläche
- 7 Teilfläche
- 8 Fokus (Brennfleckfläche)
- 9 Laser
- 10 Optik zur Strahlhomogenisierung
- 11 Strahlfalle
- 12 Kühlung
- 13 Computer
- 14 elektrische Versorgung
- 15 Abbildungs- und/oder Fokussieroptik

#### Patentansprüche

1. Vorrichtung für die Materialbearbeitung mit elektromagnetischer Strahlung (4), insbesondere mit Laserstrahlung, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein ortsauflösender Strahlmodulator (1) zur Generierung einer vorgebbaren Leistungsdichteverteilung vorgesehen ist.
2. Vorrichtung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein amplituden- und/oder phasenmodulierender Strahlmodulator vorgesehen ist.
3. Vorrichtung nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Strahlmodulator eine Anordnung einzelner, die vorgegebene Leistungsdichteverteilung steuernder Zellen (2) enthält.
4. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Zellen (2) einen beweglichen Mikrospiegel oder einen Mikropolarisator enthalten oder Flüssigkristallzellen sind.
5. Vorrichtung nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass es sich bei den Flüssigkristallen um antiferroelektrische Flüssigkristalle, dabei insbesondere um nematische, smektische oder cholestrische Flüssigkristalle, oder um ferroelektrische Flüssigkristalle handelt.
6. Vorrichtung nach mindestens einem der Ansprüche 3 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Zellen (2) individuell adressierbar sind.
7. Vorrichtung nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Strahlmodulator (1) adressierbar ist.
8. Vorrichtung nach Anspruch 6 oder 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine optische oder elektrische



Adressierbarkeit vorgesehen ist.

9. Vorrichtung nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass eine ein- oder zweidimensionale Strahlmodulation vorgesehen ist.

10. Vorrichtung nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass eine Optik (10) zur örtlich homogenen Beaufschlagung des Strahlmodulators (1) mit der elektromagnetischen Strahlung (4) vorgesehen ist.

11. Verfahren zur Materialbearbeitung mit elektromagnetischer Strahlung (4), insbesondere unter Einsatz einer Vorrichtung nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass eine vorgebbare Leistungsdichteverteilung mit einem ortsauflösenden Strahlmodulator (1) generiert wird.

12. Verfahren nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass ein Laserstrahl, und insbesondere ein Diodenlaser- oder Excimerlaserstrahl, ortsaufgelöst moduliert wird.

13. Verfahren nach mindestens einem der Ansprüche 11 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass der Strahl ein- oder zweidimensional moduliert wird.

14. Verfahren nach mindestens einem der Ansprüche 11 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass der Strahl amplituden- und/oder phasenmoduliert wird.

15. Verfahren nach mindestens einem der Ansprüche 11 bis 14, dadurch gekennzeichnet, dass die Leistungsdichteverteilung dynamisch während der Materialbearbeitung angepasst wird.

16. Verfahren zur Materialbearbeitung mit elektromagnetischer Strahlung (4), insbesondere nach einem Verfahren gemäß mindestens einem der Ansprüche 11 bis 15, dadurch gekennzeichnet, dass ein länglicher Fokus (8) vorbestimmte Teile der zu bearbeitenden Werkstückfläche (6) nacheinander abfährt, und dabei die Strahlung (4) entlang der langen Fokusachse strahl- bzw. intensitätsmoduliert wird.

17. Verwendung eines ortsauflösenden Strahlmodulators (1) zur Generierung einer vorgebbaren Leistungsdichteverteilung bei der Materialbearbeitung

---

Hierzu 5 Seite(n) Zeichnungen

---

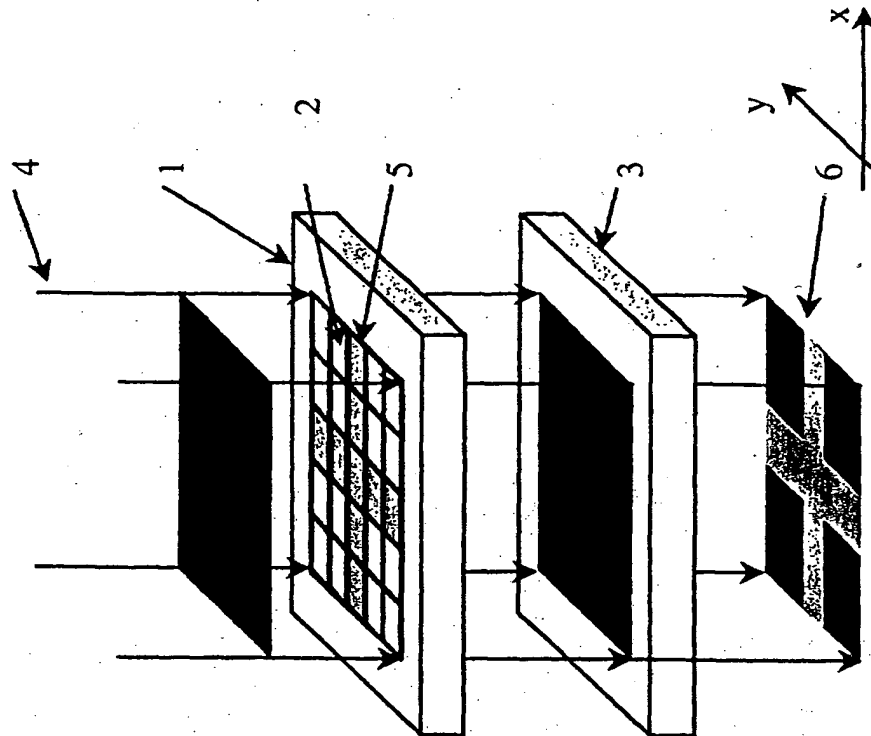


Fig. 1b

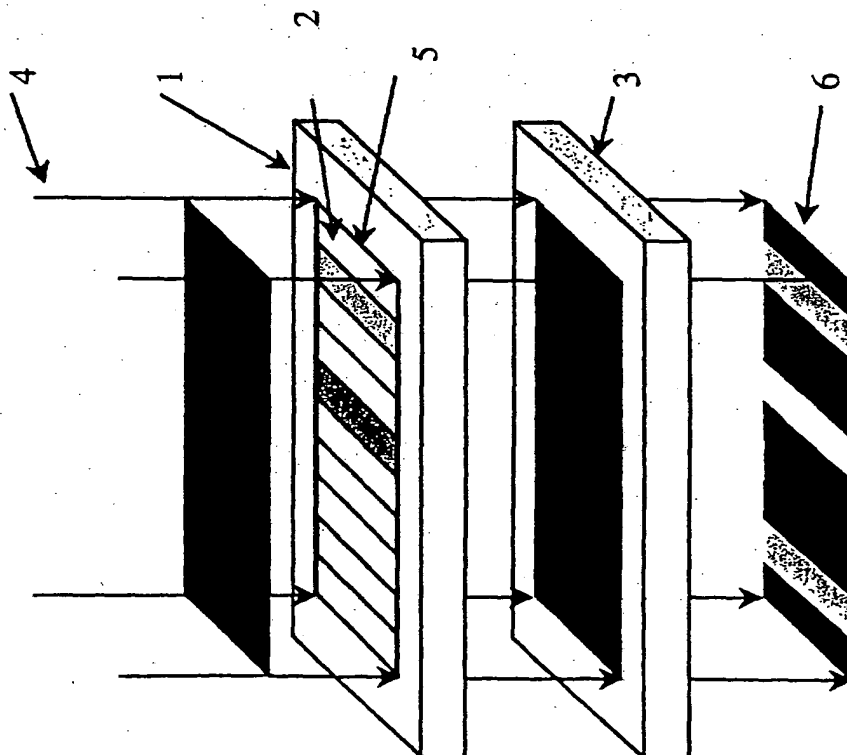


Fig. 1a

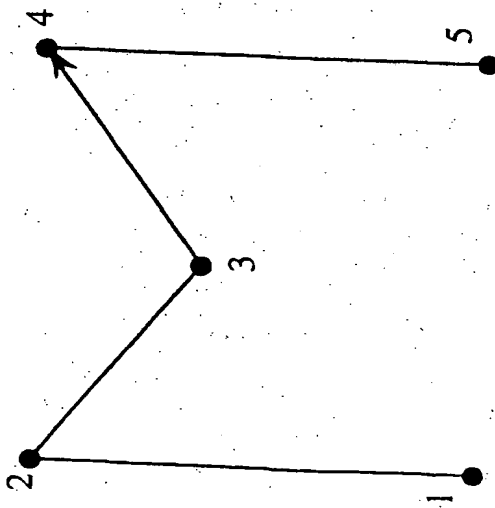


Fig. 2a

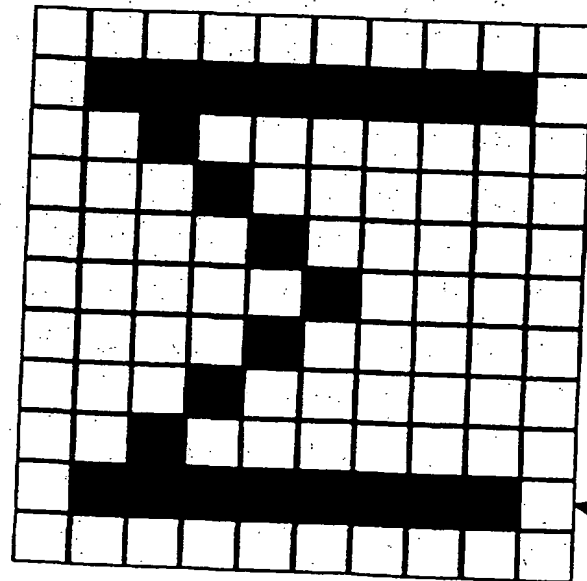
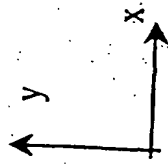


Fig. 2b

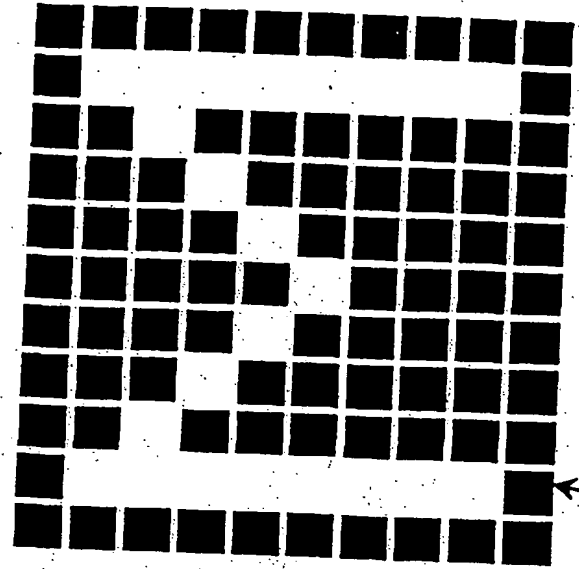


Fig. 2c



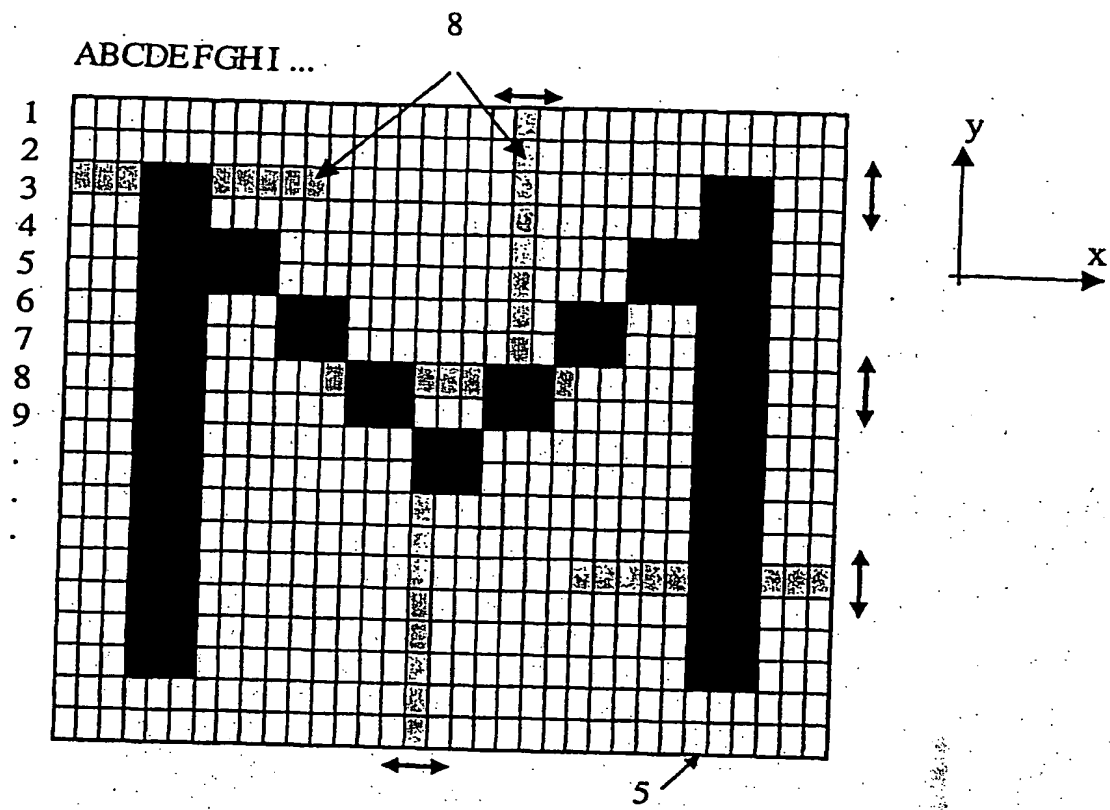


Fig. 3b

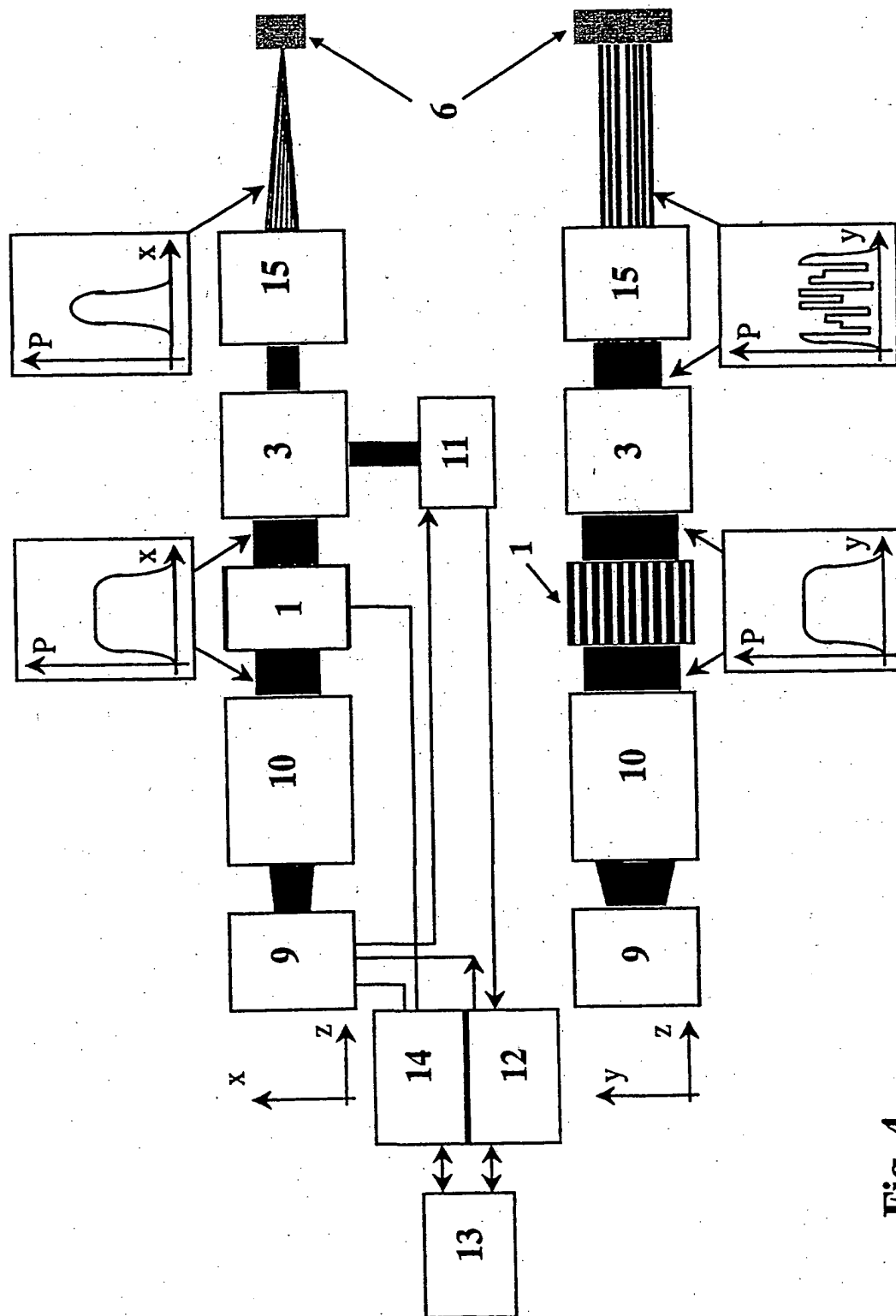


Fig. 4

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☒ FADED TEXT OR DRAWING
- ☒ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**